

*N- English lang. equivalent*

⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑪ **DE 3536538 A1**

⑤ Int. Cl. 4:  
**H02K 1/06**  
H 02 K 21/00  
H 02 K 23/04

⑦ Aktenzeichen: P 35 36 538.2  
⑧ Anmeldetag: 12. 10. 85  
⑨ Offenlegungstag: 23. 4. 87

**Behördeneigentum**

**DE 3536538 A1**

⑦ Anmelder:  
Weh, Herbert, Prof. Dr.-Ing., 3300 Braunschweig, DE

⑦ Erfinder:  
gleich Anmelder

*zurückgenommen am 2.4.88*

*Q 15.6.88*

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑥ Transversalfluß-Maschine mit Permanenterregung

**DE 3536538 A1**

1. Elektrische Maschine zur Umwandlung elektrischer in mechanische Leistung und umgekehrt, bestehend aus einem beweglichen und einem feststehenden Teil mit mindestens einer Wicklung, einer Anzahl von Permanentmagneten sowie aus Weicheisen bestehenden Polelementen, dadurch gekennzeichnet, daß bei transversaler Flußführung die Weicheisenelemente in Einheiten unterteilt sind, deren Ausdehnung in Bewegungsrichtung mit der Teilung der Magnete identisch ist, die Ankerwicklung einsträngig mit einem Leiterteil in der Verlängerung der Magnetebene angeordnet und von den Weicheisenelementen teilweise umschlossen ist.
2. Elektrische Maschine nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das feststehende Teil aus Ankerspulen und Weicheisenelementen besteht und die Magnete im Rotor zu einer beweglichen Einheit zusammengefaßt sind.
3. Elektrische Maschine nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß Magnete und Statorwicklung zu einer feststehenden Einheit zusammengefaßt sind und die Weicheisenelemente den Rotor bilden.
4. Elektrische Maschine nach obigen Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß die Ankerwicklung aus Spulen besteht, die mehrere Weicheisenelemente in einem Umlauf umfaßt.
5. Elektrische Maschine nach obigen Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß die Ankerwicklung, die einer Rotorscheibe bzw. einem Translator zugeordnet ist, in einer durchgehenden Einheit z. B. als Ringspule oder gerader Leiter ausgeführt ist.
6. Elektrische Maschine nach obigen Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß im feststehenden Teil mehrere Wicklungsabschnitte vorhanden sind, die mit phasenverschobenen Strömen beschickt werden und räumlich entsprechend der zeitlichen Phasenverschiebung der Ströme versetzt auf einen Rotor mit äquidistanter Magneteilung wirken.
7. Elektrische Maschine nach obigen Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Rotoren und Statorseinheiten zusammenwirken, wobei unterschiedliche Wicklungsstränge mit phasenverschobenen Strömen Verwendung finden.
8. Elektrische Maschine nach obigen Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß der Schnitt zwischen feststehendem und beweglichem Teil so gelegt wird, daß freie normale Kräfte entstehen, die für Trag- und Führaufgaben angewendet werden können.
9. Elektrische Maschine nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß zur Regelung der Normalkräfte im Erregerteil zusätzliche Spulen angeordnet werden, die Ströme zur Stabilisierung des Spaltfeldes führen.

#### Beschreibung

Das Funktionsprinzip elektrischer Maschinen (elektromechanischer Wandler) basiert auf der Wechselwirkung zwischen magnetischen Feldern und elektrischen Strömen.

Die vorherrschende Anordnung der Führung des magnetischen Feldes und der elektrischen Ströme läßt nur nach Maßgabe verbesserter Komponenten- und Materialeigenschaften eine graduelle Erhöhung der Leistungsdichte bzw. Verbesserung der Betriebseigen-

schaften zu.

Angestrebt wird jeweils hohe Leistungsdichte für begrenzte Werte des elektrischen Stromes und der Verluste. Dies ist gleichbedeutend mit einer hohen induzierten Spannung, die aufgrund der Änderung des magnetischen Flusses in einer Windung einer Ankerspule erzeugt wird, im Vergleich zum Spannungsabfall durch die Widerstände. Für die Beurteilung der Güte der Energiewandlung ist somit das erzielbare Verhältnis induzierte Spannung zu Spannungsabfall (das möglichst groß gegenüber 1 sein soll) eine entscheidende Größe.

Gleichwertig mit dieser Zielsetzung ist die Formulierung, daß das Verhältnis induzierte Spannung zu angelegter Spannung möglichst nahe 1 sein soll. Dieses Verhältnis entspricht (bei Vernachlässigung der nicht in der Wicklung auftretenden Verluste) dem Wirkungsgrad.

In der vorgelegten Schrift werden Anordnungen des magnetischen Kreises und der stromführenden elektrischen Leiter beschrieben, die der Bedingung höchster Effizienz besonders gut entsprechen. Der magnetische Kreis ist mit seiner Flußrichtung senkrecht zur Bewegungsordinate, d. h. transversal angeordnet. Die stromführenden Leiter, in denen bei Bewegung die induzierte Spannung entsteht, verlaufen in der Ebene der Bewegungsrichtung. Abweichend zu den bekannten Maschinenauführungen kann durch die Zahl der Anker-Eisenelemente eine Vervielfachung der induzierten Spannung erreicht werden, ohne daß am Spulenquerschnitt der Ankerwicklung Änderungen vorgenommen werden. Die Erzeugung der induzierten Spannung folgt einem günstigeren Summationsvorgang als bei bekannten Maschinenanordnungen. Wirkungsgrad und Leistungsdichte lassen sich somit erheblich steigern.

#### Die transversale Flußanordnung mit Permanentmagnet-Erregung im beweglichen Teil

Eine besonders wirksame Kraftbildung bzw. bei gegebener Geschwindigkeit eine hohe induzierte Spannung ergibt sich durch die Anwendung von energiestarken Permanentmagneten im beweglichen Teil. Im Bild 1 ist ein Element eines Energiewandlers bestehend aus dem weichmagnetischen bügelförmigen Kreis 1 mit einem in Bewegungsrichtung stromführenden Leiter 2 (Teil einer Wicklung oder Spule) gezeichnet.

Teil 3 stellt einen Permanentmagneten in ebener Anordnung als Teil einer Folge von Magneten gleicher Polarität mit Lücke dar. Dieser P-Magnet gehört entweder zum Läufer einer rotierenden elektrischen Maschine oder zu einem sogenannten Translator eines linearen Energiewandlers. Er bewirkt innerhalb des Luftspalt- raumes die magnetische Flußdichte  $B_0$ .

Mit der Bewegung des Magneten nimmt z. B. der Abstand der Magnetkante vom Außenrand des magnetischen Kreises, der mit  $x$  bezeichnet ist, zu. Der vom Magnetkreis aufgenommene magnetische Fluß ist proportional  $b - x$  (mit  $b$  der Breite der Weicheisen-Anordnung) d. h. der überdeckten flußführenden Fläche. Die in der Spule des Anker-Magnetkreises vom Fluß des P-Magneten induzierte Spannung ist der Änderung des magnetischen Flusses proportional und wird somit zu  $B_0 \cdot h \cdot v$  bestimmt. Hierbei ist  $h$  die Ausdehnung des magnetischen Feldes und  $v$  die Bewegungsgeschwindigkeit des Magneten gegenüber dem Anker.

Die induzierte Spannung behält ihren konstanten Wert bis zum Punkt  $x = b$ .

Ordnet man  $x = 0$  im Bewegungsablauf des Magneten beim Austritt aus dem Ankerkreis einen negativen

Wert der induzierten Spannung zu, so zeigt eine analoge Überlegung für den Eintrittsvorgang, daß dabei die induzierte Spannung dem Betrag nach gleich groß, aber mit umgekehrten Vorzeichen auftritt.

Mit der beschriebenen Ermittlung der induzierten Spannung kann dem Energiesatz entsprechend auch die Kraftwirkung als bekannt angesehen werden.

In Übereinstimmung mit Bild 1 läßt sich der Betrag der Kraft  $F_x$  angeben zu

$$F_x = h B_0 \Theta_a$$

$\Theta_a$  bedeutet die Summe der Ankerströme in 2 (Ankerdurchflutung).  $F_x$  behält einen auch dem Vorzeichen nach — gleichbleibenden Wert, wenn beim Eintreten einer Magnetkante in den Eisenbereich jeweils die Richtung der Ankerströme umgekehrt wird (Kommutierung). Die hierdurch erfaßte Wechselstrom-Anordnung mit rechteckförmigem Stromverlauf setzt in  $x$ -Richtung gleiche Längen ( $b$ ) für Magnete und transversale Ankerelemente sowie eine sehr schnelle Stromänderung im Vergleich zur Bewegung voraus.

Nach einem Weichselement ist für die zunächst gegebene Anordnung jeweils eine Lücke mit gleicher Breite  $b$  vorhanden; ähnliches gilt für die Magnete im beweglichen Teil.

Es sind dabei verschiedene Ausführungsformen der Ankerwicklung möglich. Gemeinsam gilt für diese, daß die Spulenachse mit der Richtung der Flußführung übereinstimmen, d. h. auch senkrecht auf der Bewegungsrichtung stehen. Das beschriebene Maschinenmodell läßt sich somit in mehrere anwendungsgerechte Versionen umwandeln und kann grundsätzlich für rotierende oder lineare Bewegungen genutzt werden. Für das bewegliche Teil gilt, daß die Magnete in gleicher Teilung angeordnet werden.

Um eine hohe induzierte Spannung bzw. eine große Kraft je Ankerelement zu erzielen, ist eine Vervielfachung der Kraft und des Induktionseffektes erwünscht. Wie die obenerwähnte Rechnung zeigt, ist die Größe der induzierten Spannung von der Breite der Eisenteile  $b$  (in Bewegungsrichtung) unabhängig. Durch Verringerung dieser Abmessung und gleichzeitiger Verringerung der Magnetbreite kann somit eine Erhöhung der Maschineneffizienz bewirkt werden. Eine größere Zahl von Maschinenelementen wird hier mit der zusätzlichen Möglichkeit der Beibehaltung des wirksamen Wicklungsquerschnitts verbunden. Die Verringerung der Polbreite steht somit nicht im Zusammenhang mit einer Schwächung der Kraftwirkung je Einzelelement. Für die Ankerwicklung bedeutet die Verringerung der Polteilung eine verstärkte Ausnutzung. Bei gegebener Bewegungsgeschwindigkeit  $v$  ist die Frequenz der notwendigen Stromänderungen gegeben durch  $v/2b$ . Die Kommutierungsgeschwindigkeit für die Richtungsänderung des Ankerstroms hängt von der Größe der Induktivität der Ankerwicklung ab und ist proportional der wirksamen Spannungsdifferenz. Bei der Anwendung von Permanentmagneten zur Erregung der Luftspaltflußdichte  $B_0$  ist die magnetische Leitfähigkeit des Ankerkreises verhältnismäßig klein, so daß die Ankerinduktivität ebenfalls gering und bei gegebener Ankerspannung die erzielbare Kommutierungsgeschwindigkeit verhältnismäßig groß ist. Hierdurch lassen sich bei gegebener Leistungsgröße des Frequenzumrichters vergleichsweise hohe Betriebsfrequenzen erzielen. Es ist somit möglich, durch kleine Polteilungen eine hohe Kraftdichte, verhältnismäßig hohe induzierte Spannung

und damit kleine Baugrößen bei hohem Wirkungsgrad zu realisieren.

Wie sich zeigt, ist weiterhin ein Vervielfachungsfaktor 2 auch dadurch zu erzielen, daß entsprechend Bild 2 anstelle einer Lücke in der Magnetbesetzung des beweglichen Teils ein in der Polarität gegenüber 3 jeweils geänderter Magnet 3' (Südpol  $S$  gegenüber dem Nordpol  $N$ ) angeordnet wird. Die induzierte Spannung und die Kraftwirkung verdoppeln sich hierdurch. Die je Ankerelement erzielbare induzierte Spannung beträgt nun  $2hB_0v$ ; während sich die Kraftwirkung zu  $F_x = 2hB_0\Theta_a$  ergibt.

Voraussetzung für die hier angeführten Werte ist, daß im Ankerkreis keine nennenswerten Sättigungserscheinungen auftreten. Die obere Grenze für die Größe der Ankerdurchflutung  $\Theta_a$  folgt aus den Überlegungen zur Begrenzung des Einflusses dieser Ströme auf das magnetische Feld innerhalb der Permanentmagnete. Je nach Magnetkennlinien (Zusammenhang zwischen  $B$  und  $H$ ) lassen sich für die angestrebten reversiblen Entmagnetisierungen die vom Strom  $\Theta_a$  erzeugten zulässigen Feldkomponenten ermitteln. Neue Magnetmaterialien hoher Energiedichte ermöglichen ähnlich wie magnetische harte Ferrite eine Entmagnetisierung bis etwa zur Flußdichte des Magneten  $B_0 = 0$ . Dies wird in jenen Magneteilen erreicht, bei denen das von  $\Theta_a$  erzeugte Gegenfeld gleich der Leerlaufinduktion  $B_0$  ist.

Offenbar ist in Anbetracht des großen magnetisch wirksamen Spaltes dies im allgemeinen ein sehr hoher Grenzwert; er nimmt mit zunehmender Höhe der Permanentmagnete zu.

Bezieht man die erzielbare Kraft auf die Grundfläche der Magnete, also auf  $2hb$  (je Polelement), so ergibt sich die Kraftdichte zu

$$F_{Ax} = \frac{1}{b} \Theta_a B_0$$

Im Vergleich zu den Wandlern mit longitudinalem Magnetfluß zeigt sich nun ein Faktor  $1/b \Theta_a$  anstelle des sonst bekannten Strombelags.

Da der Wicklungsstrom  $\Theta_a$  sehr groß gewählt werden kann, und  $b$  in Anbetracht der Leiteranordnung in Bewegungsrichtung kleiner als bei hochausgenutzten Wandlern der klassischen Bauart sein darf, lassen sich grundsätzlich hohe Kraftdichten erzielen. Die Herausnahme der stromführenden Ankerspule aus der unmittelbaren Durchtrittsfläche des magnetischen Flusses im Luftspalt läßt darüber hinaus höhere mittlere Flußdichten für den Magnetkreis zu und verstärkt so zusätzlich die ausführbare Schubkraftdichte. Nimmt man als Beispiel eine von Permanentmagneten erzeugte Flußdichte von  $B_0 = 1,0$  T im Luftspalt (bei einer Remanenzinduktion von z. B. 1,3 T) und einer Magnethöhe von 3 cm, so folgt daraus der obere Grenzwert für die Ankerdurchflutung zu etwa 30 kA. Wird eine Polteilung von 6 cm ausgeführt, so entspricht dem ein äquivalenter Strombelag von 5000 A/cm und eine Kraftdichte von 500 kN/m<sup>2</sup>.

Dies ist ein Mehrfaches der üblichen Werte. Durch die weitgehend freizügige Gestaltung des Spulenquerschnitts und der Nut (außerhalb des Permanentmagneten) kann unabhängig von der Flußdichte im Luftspaltbereich die Stromdichte so gewählt werden, daß die Ankerspule mit einer noch konventionellen Kühlung betrieben werden kann. Wie sich zeigt, lassen sich bei entsprechender Wahl der Entwurfsparameter  $h$ ,  $b$ ,  $B_0$ , der Ankerdurchflutung  $\Theta_a$ , sowie der Magnethöhe außerordentlich verlustarme Maschinen mit einfachem geometrischen Aufbau angeben. Strombeläge der Grö-

Benordnung von 5000 A/cm lassen sich in der klassischen Bauform nur zusammen mit Maßnahmen für eine außerordentlich intensive Kühlung (direkte Wasserkühlung) konzipieren. Sofern Gleichstrom verwendet werden kann, wird für Strombeläge dieser Größe bereits Supraleitung (mit Kühlung durch flüssiges Helium) herangezogen. Mit der hier beschriebenen Funktionsform wird auch noch bei der Anwendung indirekter Kühlmethoden ein Kraftdichtebereich erschlossen, der bislang nur besonderen technologischen Anstrengungen und damit letzten Endes einem Maschinenbereich größter Leistungsklassen vorbehalten war. Die beschriebene Lösung ist im Gegensatz hierzu auf kleine und große Leistungen anwendbar und erfordert weder aus der Sicht der Kühltechnik noch bezüglich der Herstellungstechnologie ungewöhnliche Maßnahmen. Insbesondere durch die Wicklungsausführung läßt sich eine gute Anpassung an die Anwendungsbedingungen erreichen.

#### Beispiele für Wandlerkonfigurationen:

Für rotierende Maschinen ist von bisher durchgeführten Arbeiten und Vorschlägen bekannt, daß Läufer mit Permanentmagneten in den verschiedensten Formen, etwa als zylindrischer oder scheibenförmig gestalteter Läufer ausgeführt werden können. Die hier vorliegenden Funktionsbedingungen sowie die stromführenden Spulen mit Leitern in Umfangsrichtung lassen ebenfalls zylinderförmige und scheibenförmige Anordnungen zu. Bild 3 zeigt das Beispiel einer Maschine in Scheibenform. Bild 3a stellt einen Teil der Stirn-Ansicht, Bild 3b einen Längsschnitt dar. Die Maschine besteht aus zwei Scheibenläufern 1 und 1', die mit einer Welle 2 verbunden sind. Den Läufern sind die Ankerelemente 4 und 4' zugeordnet. Die Ankerspulen sind mit 5 und 5' bezeichnet. Die Ankerelemente 4 und 4' sind am Konstruktionsteil 6 befestigt, der das Lager für die Welle enthält. Sie können radial von außen in das Konstruktionsteil 6 eingeführt und dort befestigt werden. Die Scheibenform des Rotors ermöglicht, daß ein einfacher Aufbau mit einer hohen Zahl von Magneten in Umfangsrichtung erzielt werden kann. Die einzelnen Elemente von Rotor und Ankerkreis sind dabei identisch ausgeführt. Die Umfangs- und Lagerkräfte werden über das Konstruktionselement 6 auf das Fundament abgestützt. Die Grundform dieser Maschine eignet sich als Mehrscheibenanordnung. Das einzelne Ankerelement erfüllt wie beschrieben die Funktion einer Wechselstrommaschine mit über die stromführende Periode nahezu konstanter induzierter Spannung. Allerdings entspricht die in Bild 1 mit  $x = 0$  bezeichnete Magnetlage der induzierten Spannung 0. In dieser Stellung umfaßt die Ankerwicklung den Maximalwert des magnetischen Flusses. Gleichbedeutend mit verschwindender induzierter Spannung ist der an dieser Stelle eintretende Rückgang der Schubkraft auf den Wert 0. Soweit Kommutierungs- und Feldverlauf nicht ideal rechteckförmige Verläufe aufweisen, ist im Bereich  $K_{xx} = 0$  mit einem Krafteinbruch endlicher Ausdehnung zu rechnen.

Um in der Gesamtkraft, die auf eine Läuferscheibe wirkt, diesen Kraftrückgang weitgehend auszugleichen, läßt sich das bekannte Verfahren der Unterteilung in mehrere elektrisch voneinander unabhängige Teilstränge mit phasenverschobenen Strömen anwenden. Die Spulen 5 und 5' sind demgemäß in Gruppen zusammengefaßt, die jeweils Ströme gleicher Phasenlage führen. Entsprechend dieser Phasenlage ist die Anordnung der zugehörigen Ankerelemente in Bezug zum Polrad (in

Umfangsrichtung) versetzt. Damit entstehen mehrphasige Anordnungen, bei denen das Polrad selbst Magnete in äquidistanter Teilung aufweist. Eine Überlappung von Spulen verschiedener Stränge wird vermieden. Bild 4 zeigt die Kraftverläufe für eine Anordnung mit zwei um  $90^\circ$  versetzten Ankersträngen.

Bild 4a enthält den Kraftverlauf der Phase a, während Bild 4b den zeitlich verschobenen Verlauf  $F_b$  der Phase b darstellt. Die Überlagerung beider Kraftanteile ist in Bild 4c dargestellt. Es zeigt, daß die Größe der Einbrüche bezogen auf den mittleren Wert durch Überlagerung der Wirkung mehrerer Stränge zurückgeht. Eine höhere Strangzahl verstärkt diesen Effekt.

Eine besonders einfache und verlustarme Ausführung der Ankerwicklung entsteht dadurch, daß die gleichphasig betriebenen Ankerelemente durch Spulen gespeist werden, die in Umfangsrichtung mehrere Ankerelemente in einem Spulenumlauf umschließen. Je nach Größe der Maschine erscheint es dann zweckmäßig, z. B. 3, 4 oder mehrere Ankereinheiten mit jeweils einer gemeinsamen Spule auszuführen. Bild 5 zeigt hierzu das Beispiel einer in 4 Einheiten unterteilten Maschine mit der Ankereinheit AE, die 8 Einzelelemente B umfaßt. Die Spulen Sp werden mit Strömen unterschiedlicher Phasenlage betrieben und sind gegenüber den Läuferelementen räumlich versetzt angeordnet.

Ein Betrieb der Maschine ist ohne einseitigen magnetischen Zug auf die Welle auch dann möglich, wenn einzelne Segmente durch ihren Wechselrichter abgeschaltet oder durch eine Störung nicht betriebsbereit sind. Es erscheint ebenso möglich, z. B. bei Wicklungsschaden, ein Teilsegment (oder mehrere) radial zu entfernen, ohne daß der Läufer ausgebaut oder die gesamte Maschine demontiert werden muß. Die restlichen Segmente sind auch ohne Änderung ihrer Stromspeisung weiterhin betriebsfähig. Die Vorteile eines in dieser Form modular aufgebauten Energiewandlers liegen in seiner Einfachheit und den damit verbundenen Anpassungsformen an besondere Betriebsfälle.

Eine weitere Anwendungsvariante mit wiederum verringerten Wicklungsverlusten entsteht, wenn alle am Umfang angeordneten Ankerelemente mit einer einzigen durchgehenden Spule induktiv gekoppelt sind. In diesem Fall kann auch der Rückschluß der Spule entfallen, so daß die Masse des nichtaktiven Leiterteils auf ein Minimum beschränkt wird. Eine solche Anordnung zeigt Bild 6. In ihrer mechanischen Anordnung ist diese Maschinenform besonders vorteilhaft; sie läßt sich auf Generatoren und Motoren in gleicher Weise übertragen. Eine mehrsträngige Anordnung kann in diesem Fall z. B. für 2- oder Mehrscheibenanordnungen verwirklicht werden.

Soll die Zahl der Pole zum Beispiel aufgrund einer Vorgabe von Frequenz und Drehzahl gering gehalten werden, so geht mit der Polzahl die Kraft je Flächeneinheit zurück. Es erscheint dann erwünscht, die Wirksamkeit der Energieumwandlung durch andere Mittel weiter zu steigern. Ein Faktor 2 kann dadurch erzielt werden, daß in den bisher zugelassenen Zwischenräumen der Ankerelemente jeweils zusätzliche Magnetkreise angeordnet werden. Die in diesen zusätzlichen Ankerelementen erzeugten induzierten Spannungen sind im Vergleich zu denen der vorher bereits vorhandenen Elemente (bezogen auf den gleichen Wicklungssinn) entgegengerichtet. Sie verlangen also zur Erzielung eines positiven Beitrags eine besondere Wicklung bzw. eine Wicklung mit einem geänderten Anschluß an die Energieversorgung.

siehe Fig. 5

Segment

Handwritten notes and signatures at the bottom right of the page.

Um genügend Wicklungsquerschnitt unterbringen zu können, lassen sich bestimmte Formgebungen für den Eisenkreis ausführen. Es erscheint dabei zweckmäßig, die Wicklung mit zwei Teilsulen entsprechend Bild 7a und 7b zu gestalten. Hierdurch wird eine Begrenzung der Höhe der Ankerelemente sowie eine geringe Wicklungshöhe in Bewegungsrichtung erreicht. Auch jetzt ist es ohne Schwierigkeiten möglich, am Umfang einer Scheibe mehrere verschiedene Stränge unterzubringen. Die Bilder 7a und 7b stellen Schnitt und Teilansicht einiger Polelemente dar. Bild 7c zeigt, daß die Formgebung des Eisenkreises so gewählt ist, daß die Innenabmessung der Spule eine kleinere Breite besitzt, als die größte Polschuhbreite. Hierbei kann für den Polschuh ein in allen Richtungen leitfähiges Material Verwendung finden. Das U-förmige Ankerteil läßt sich durch einen lamellierten Aufbau einfach herstellen.

#### Läufer mit Weicheisenelementen

Die Bewegung der Magnete gegenüber den Ankerelementen, die aus dem Eisenkreis und der Wicklung bestehen, ergibt für viele Anwendungen eine günstige Maschinenbauform. Insbesondere lassen sich beim Läufer auch sehr kleine Schwungmassen erreichen. Für weitere Anwendungen ergibt sich eine günstige Gestaltung der Maschine, wenn statt der Permanentmagnete die Weicheisenelemente mit dem Rotor verbunden werden. In diesem Falle werden die Permanentmagnete sowie die Ankerwicklung zu einer Statoreinheit zusammengefaßt und gegenüber dem Fundament abgestützt. Das Prinzip der Krafterzeugung führt wie bei bewegten Magneten zum gleichen Ergebnis.

Eine besonders konstruktive Variante ergibt sich wieder bei einer Ankerwicklung in Form einer Ringspule ähnlich Bild 6. Hierbei besteht für den Läuferaufbau jedoch der Vorteil, daß die Eisenelemente für den magnetischen Fluß in der Lage sind, durch die Bewegung auftretende Zugspannungen aufzunehmen. Bei Permanentmagneten hingegen muß die auftretende Zugspannung vermieden oder durch zusätzliche Konstruktionselemente kompensiert werden. Damit lassen sich auch ohne Schwierigkeiten zylinderförmige Maschinen konzipieren. Bild 8 stellt eine solche Anordnung dar. Es sind zwei seitlich angeordnete ringförmige Wicklungen  $W$  und  $W'$  mit den zylinderförmig aufgebauten Magneten  $M$  und  $M'$  verbunden. Letztere sind aus einer im allgemeinen größeren Zahl von einzelnen Magneten (z. B. in wechselnder Polarität) bestückt. Die Anschlüsse der Wicklungen  $M$  und  $M'$  sind an den Magneten vorbei zum Mittelteil des Stators  $C$  geführt und dort mit den Klemmen verbunden. Über  $C$  wird die Welle gelagert und die Maschine auf dem Fundament befestigt. Die Läufer  $L$  und  $L'$  bestehen aus den transversalen Magnetkreiselementen  $K$  und  $K'$  in gleichmäßiger Teilung. Sie sind in Bild 8 (als Beispiel) so gestaltet, daß sie aus jeweils zwei Teilen  $K_1$  und  $K_2$  zusammengefügt sind, die für sich ringförmige Strukturen darstellen. Die Stator- und Rotorteile lassen sich somit in mehreren Schritten montieren.

Es liegt nahe, daß die beiden Maschineneinheiten mit den Wicklungen  $W$  und  $W'$  so betrieben werden, daß zwei versetzte Stränge mit phasenverschobenen Strömen die Kraftschwankungen minimieren.

Es soll betont werden, daß die in Bild 8 dargestellte Form eine Möglichkeit als Beispiel darstellt, daß darüber hinaus auch scheibenförmige Anordnungen ähnlich den oben beschriebenen Konfigurationen sich vor-

teilhaft anwenden lassen. Die Zusammenfassung von Wicklung und Magneten zu einer Statoreinheit kann für Anwendungen, bei denen geringe Schwungmassen des Rotors nicht im Vordergrund stehen, sehr vorteilhaft im Hinblick auf die mechanische Beanspruchung der Magnete sein. Es besteht auch die Möglichkeit, einen Teil des Weicheisenkreises mit dem Stator zu verbinden und eine geänderte Polform für die im rotierenden Teil verwendeten Elemente einzusetzen.

Zusammenfassend lassen sich die hauptsächlichsten Vorteile der beschriebenen Maschinenvarianten so beschreiben:

1. Es wird die Möglichkeit geschaffen, bei sehr kleinen Maschinenabmessungen und geringen Massen für Wicklung und Magnetwerkstoffe die elektromechanische Energieumwandlung zu vollziehen.

2. Die transversale Flußführung ergibt bei kleinen Polteilungen die Möglichkeit, höhere Wirkungsgrade gegenüber Maschinen mit konventioneller Flußführung zu erzielen.

3. Durch Vergrößerung der Höhe der Permanentmagnete läßt sich die Größe der anwendbaren Ankerdurchflutung und damit die Kraft je Pol steigern, so daß sehr hohe Kraftdichten erreicht werden können.

4. Trotz hoher Kraftdichte läßt die geometrische Anordnung der Wicklung moderate Stromdichten und somit konventionelle Kühlung zu.

5. Das transversale Flußführungsprinzip ermöglicht bei Anwendung von Permanentmagneten Maschinen in Scheiben- und Zylinderbauform.

6. Durch die Verwendung von Permanentmagneten ergibt sich eine Wicklung mit geringer Induktivität, so daß schnell kommutierende Stromkreise entstehen, die mit einer hohen Frequenz betrieben werden können.

7. Die Maschine läßt sich in ihrer Bauform den mechanischen Erfordernissen gut anpassen und läßt z. B. einen Teilbetrieb auch nach Demontage einzelner Ankereinheiten zu, da nicht überlappende Wicklungen verwendet werden können.

#### Anwendung für Linearantriebe

Die bei rotierenden Maschinen bestehenden Eigenschaften lassen für das Verfahren der transversalen Flußführung im Zusammenhang mit Permanentmagneten bereits gute Voraussetzungen für eine Anwendung bei linearen Antrieben erkennen. Hierbei stehen Anwendungen für die Transport- und Bahntechnik im Vordergrund. Die in Bild 8 beschriebene Maschinenbauform läßt sich z. B. in einen Linearmotor umwandeln, wobei die Magnetkreiselemente  $K$  der passiven Reaktionsschiene, die Wicklung und die Magnete dem am Fahrzeug befestigten Maschinenteil (Kurzstator) zugeordnet werden. Die hohe Kraftdichte bewirkt für die Dimensionierung den Vorteil, daß verhältnismäßig wenig Material für die Trassenelemente benötigt wird. Es soll dabei erwähnt werden, daß die in Bild 8 getroffene Aufteilung auf Stator und bewegliche Teile insofern veränderbar ist, als der Schnitt zwischen beiden Einheiten auch in das Weicheisenteil  $K$  verlagert werden kann.

Ein Beispiel hierfür wird in Bild 9 gegeben.

Insgesamt läßt die hohe Kraftdichte eine hohe Ausnutzung des aktiven Materials und eine Beschränkung der Herstellungskosten auch bei Linearantrieben als gesichert erscheinen. Der Aufbau der im Fahrzeug unterzubringenden Komponenten ist einfach und erfordert nur wenig hochwertiges Material. Es besteht bei der Kurzstatoranordnung im wesentlichen aus den Perma-

mentmagneten und der Wicklung.

Auch für Langstatoranwendungen sind besondere Vorteile erkennbar. Hierbei ist die Ausführung einer geometrisch einfachen Wicklung mit geringen Verlusten von besonderem Interesse. Die transversale Flußführung kommt mit einer Statorwicklung aus, die als gerader Leiter (ohne Meanderform) in Richtung der Fahrzeugbewegung ausgeführt ist. Bei Übergang auf kleine Polteilungen wird der Ankerstrom gesenkt und die induzierte Spannung erhöht. Letzteres kann durch Verwendung geeigneter Komponenten im System der Energie-Zuführung und -aufbereitung ohne Nachteile für die Kosten aufgefangen werden. So lassen z. B. neue Halbleiterbauteile für Wechselrichter sowohl hohe Spannungsbeanspruchung als auch Eignung für hohe Betriebsfrequenzen erkennen. Die damit verbundene Verringerung des Leiterstromes im Anker führt zusammen mit der Verringerung der effektiven Wicklungslänge (gerader Leiter) zu erheblichen Verlustreduktionen gegenüber bekannten Lösungen. Als Folge des verkleinerten Ankerstromes ergibt sich eine geringe Magnetfeldstärke außerhalb des Erregerteils des Fahrzeuges. Die damit verbundene geringere Magnetische Energie verringert die notwendige Blindleistung für die Magnetisierung der Streufelder. Dies bedeutet schließlich, daß ohne Verschlechterung der Betriebseigenschaften auch größere Wicklungslängen an die Energieversorgung angeschlossen werden können, wodurch sich abermals der Aufwand für zusätzliche Maßnahmen wie energiezuführende Kabel, Schalter, Verbindungsstellen zur Wicklung u. s. w. verringert.

Um eine auch der magnetischen Tragtechnik gemäße Form für die aktiven Elemente zu erreichen, kann der Schnitt zwischen den Eisenoberflächen durch den Motor so gewählt werden, daß das magnetische Feld im Luftspalt sowohl Trag- als auch Traktionskräfte entwickelt.

Bild 9 zeigt eine Ansicht des feststehenden Stators  $St$  und des bewegten Translatorelements  $T$ . Zu erkennen sind die geradlinig ausgeführte Statorwicklung  $W$  und die feststehenden Eisenelemente  $SE$ , die zur Unterdrückung der Wirbelströme lamelliert sind. Das Erregerteil besteht aus in Längsrichtung alternierend angeordneten Permanentmagneten  $M$  und den Weicheisenelementen  $TE$ . Diese Elemente können durch zusätzliche Erregerspulen  $E$  erregt werden, wenn eine Kraftregelung vorgenommen werden soll. Hierbei wird davon ausgegangen, daß die Permanentmagnete  $M$  den Nominalwert des Flusses zur Erzeugung der Tragkraft und die Erregerspulen  $E$  den zur Stabilisierung der Tragkraft notwendigen dynamischen Feldanteil im Zusammenwirken mit einer Spaltregelung erzeugen. Es ist bekannt, daß dieses Überlagerungsprinzip zu einem dynamisch hochwertigen Tragverfahren gestaltet werden kann. Die regelbaren Tragkräfte werden somit von einem Linear- motor erzeugt, dessen Magnetfeld sowohl Trag- als auch Vortriebsfunktion simultan erfüllt. Hierdurch sind hohe Fahrgeschwindigkeiten bei geringen Gesamtverlusten erzielbar. Es wird ein einfaches Stromführungssystem bei guter Energienutzung und günstigen Betriebsbedingungen möglich. Erwähnt wurde bereits, daß die unterschiedliche Schnitteleitung im Magnetkreis zur simultanen Erzeugung von Normal- und Vortriebskräften auch für Kurzstator-Anwendungen genutzt werden kann.

Bild 10 zeigt zur Verdeutlichung der erzielbaren Vorteile durch das transversale Feldführungsprinzip mit Permanentmagneten einen etwa maßstäblichen Ver-

gleich der Spannungsdiagramme. Hierbei stellt das Diagramm Bild 10a das herkömmliche Antriebskonzept in seinen Größenbeziehungen mit den Teilspannungen dar. Es bedeuten:

- 5  $U_p$  die (induzierte) Polradspannung entsprechend der Summe aller Teilspannungen der Ankerelemente
- $X_{hJ_a}$  induktiver Spannungsanteil durch die Hauptreaktanz
- 10  $X_{\sigma J_a}$  induktiver Spannungsanteil durch Streureaktanz

Es ist zu erkennen, daß zwischen dem Ankerstrom  $J_a$  und der resultierenden Ankerspannung  $U_a$  eine große Phasenverschiebung (Winkel  $\varphi$ ) besteht. Hingegen zeigt Bild 10b für den Betrieb mit transversaler Flußführung ein verhältnismäßig schlankes Diagramm mit kleinem Phasenwinkel. Dies ist entsprechend obiger Beschreibung vornehmlich auf die Verringerung der induktiven Streuspannung  $X_{\sigma J_a}$  zurückzuführen. Bemerkenswert ist aber auch der starke Rückgang des ohmschen Anteils. Wirkungsgrad und Leistungsfaktor der Anordnung verbessern sich entsprechend. Die Scheinleistung der Wechselrichter wird kleiner; hierbei sind gleiche Abschnittslängen vorausgesetzt.

Es kann festgestellt werden, daß nunmehr eine stark verbesserte Energieumwandlung und eine Verringerung des Aufwandes insbesondere für den Stator und Unterwerk ermöglicht wird. Letzteres ist im Hinblick auf die verhältnismäßig hohen Kostenanteile für die Antriebskomponenten entlang des Fahrweges von großer Bedeutung.

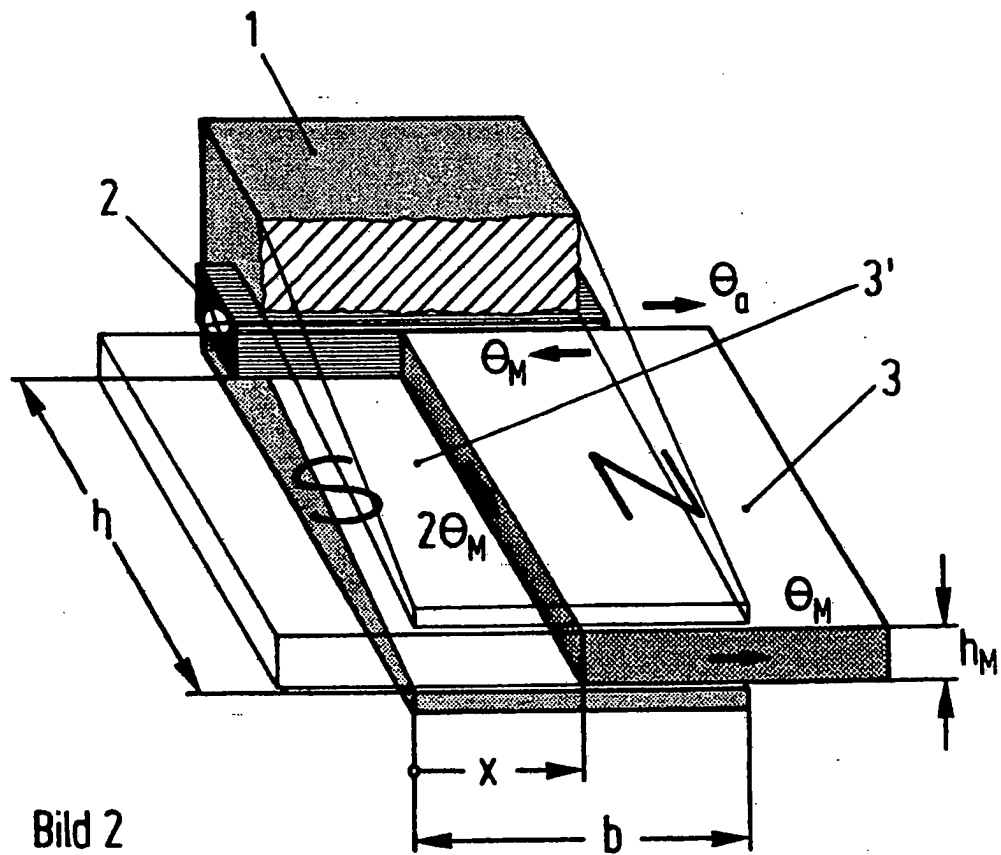
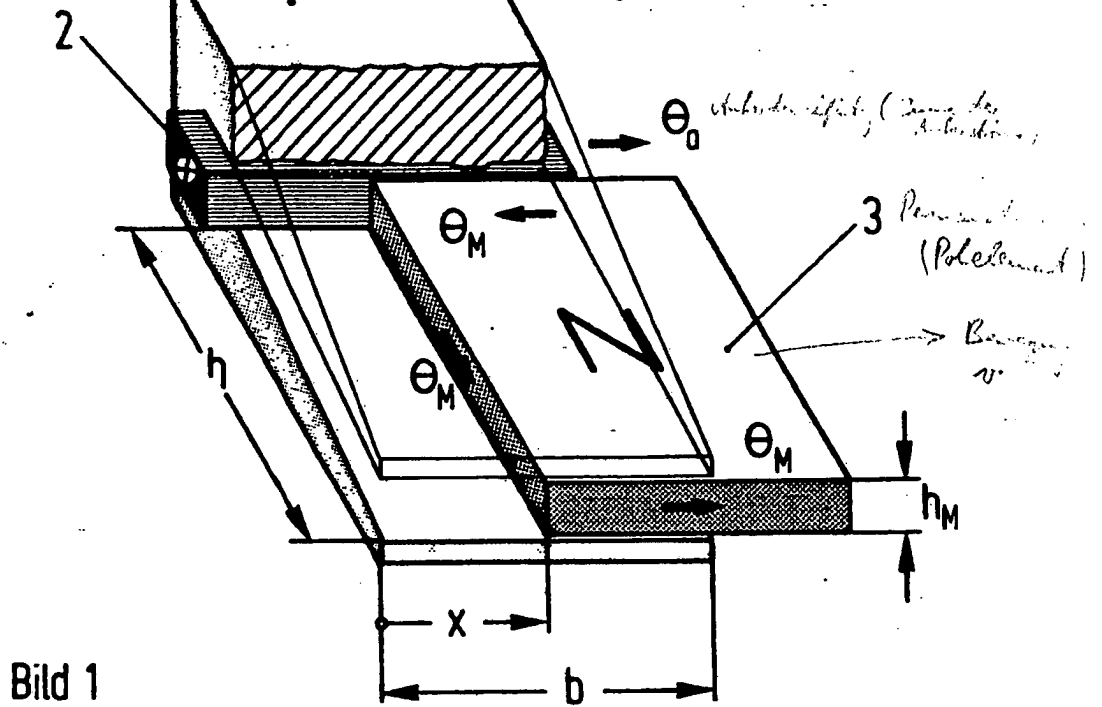
Wird — wie oben erwähnt — eine Verlängerung der Wicklungsabschnitte angestrebt, so lassen sich weitere Vereinfachungen für die Energiezufuhr in Verbindung mit Kostenvorteilen erkennen.

3536538

-26-

Nummer:  
Int. Cl. 4:  
Anmeldetag:  
Offenlegungstag:

35 36 538  
H 02 K 1/06  
12. Oktober 1985  
23. April 1987



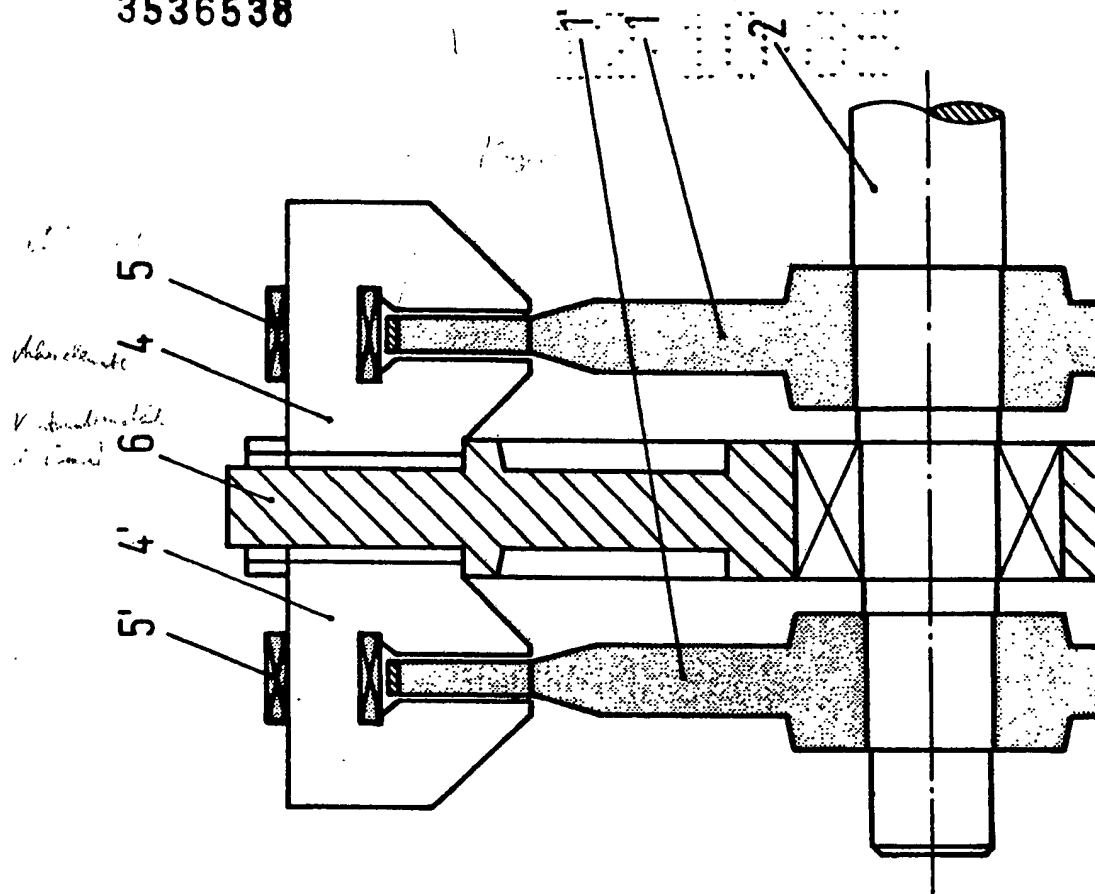


Bild 3b

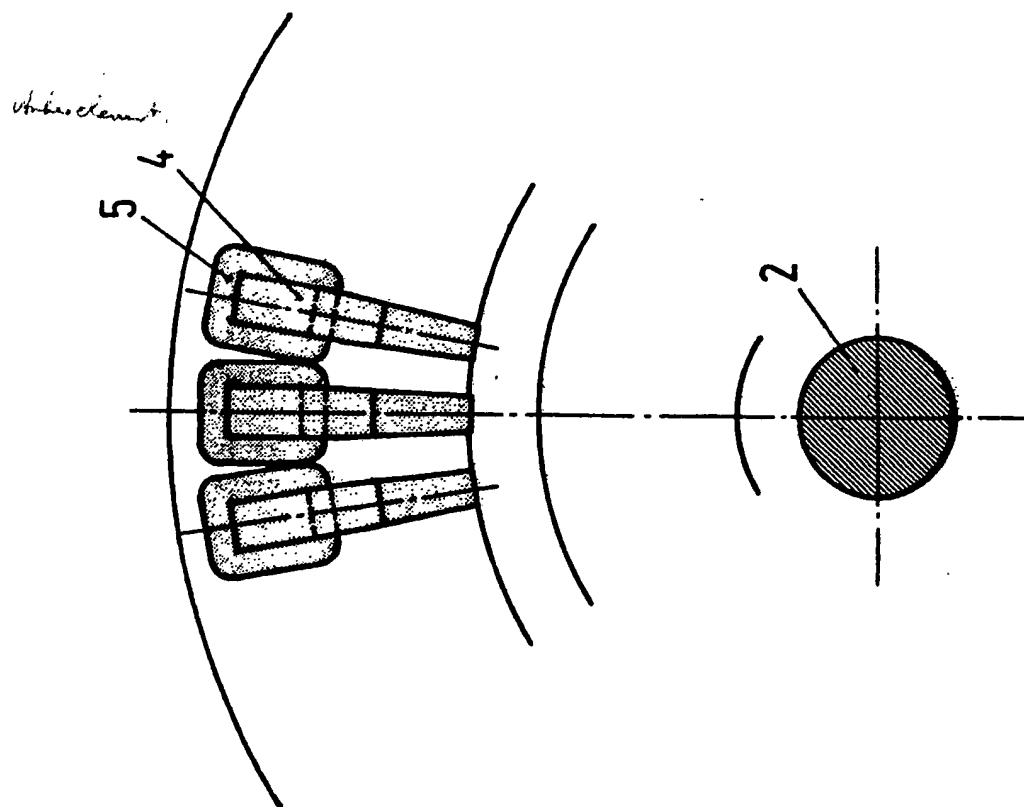


Bild 3a



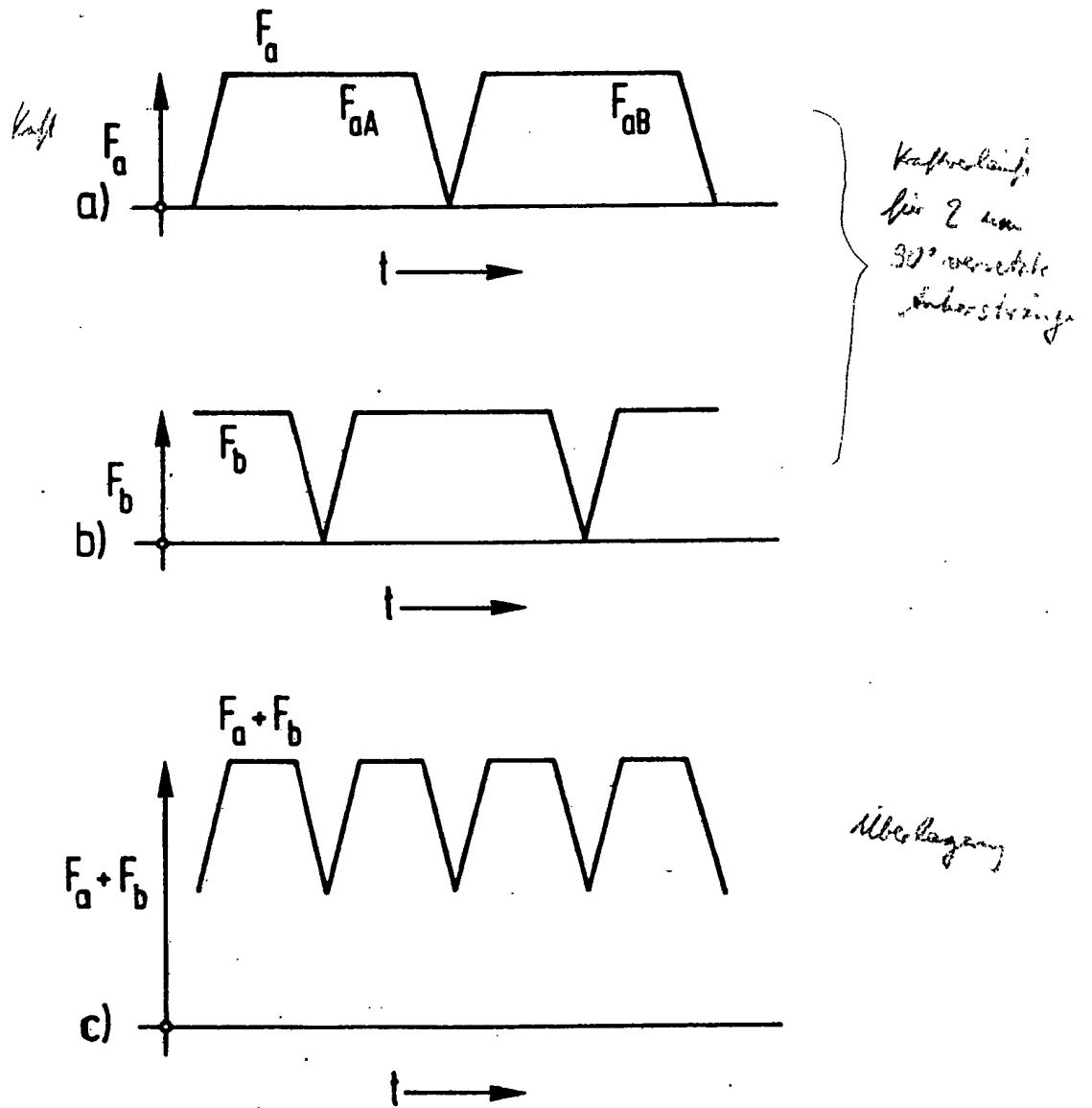


Bild 4

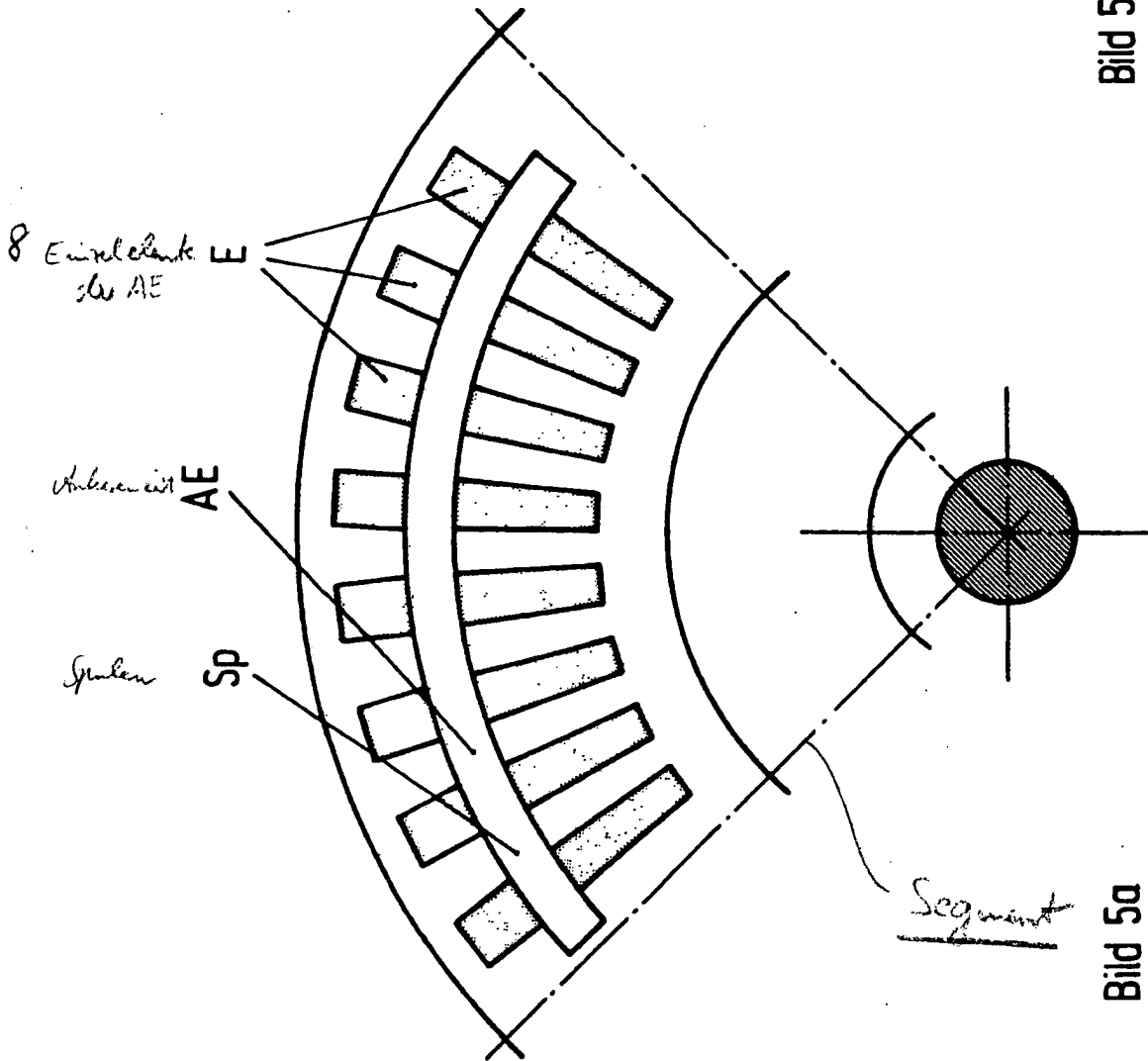
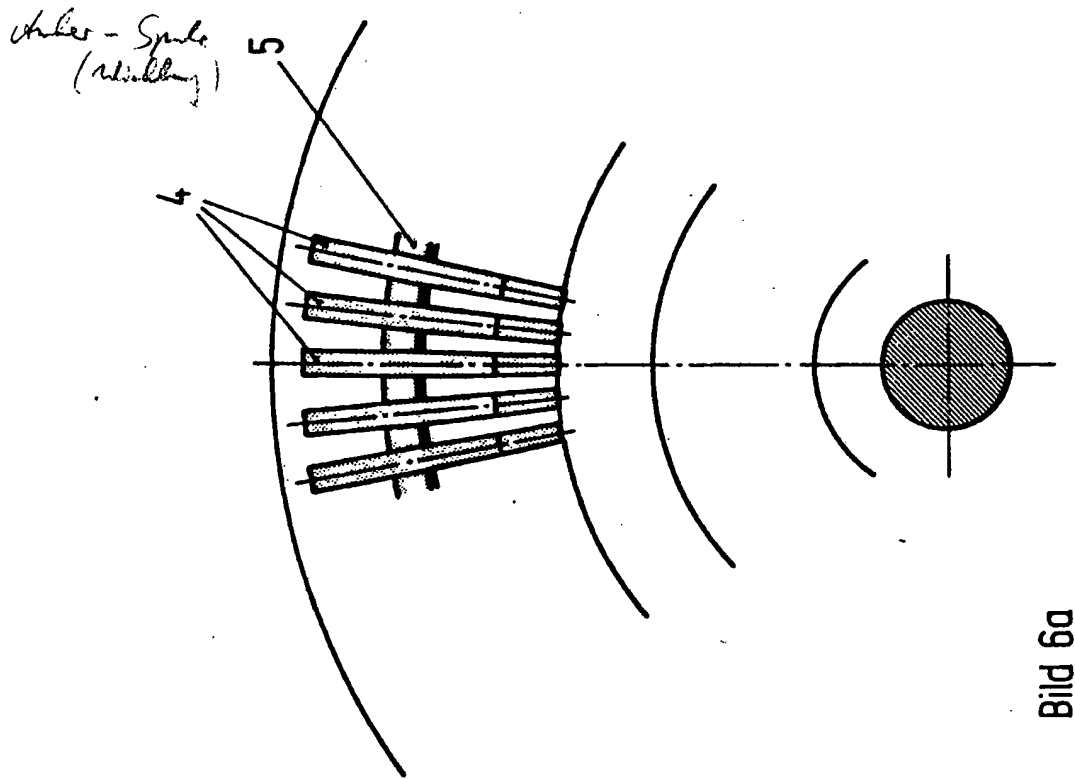
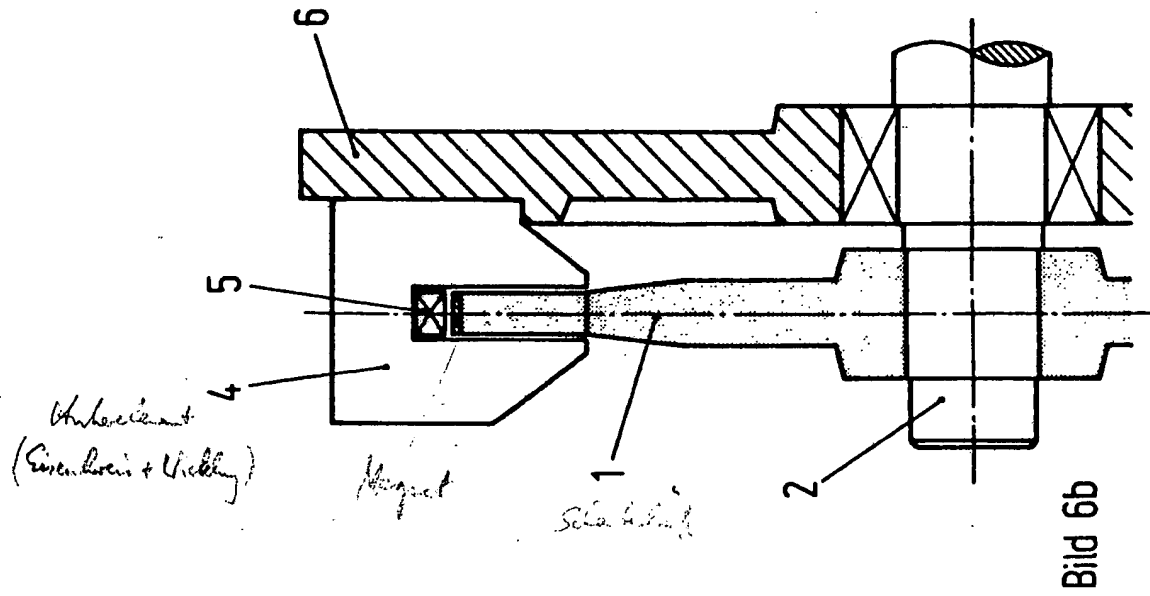


Bild 5b

Bild 5a



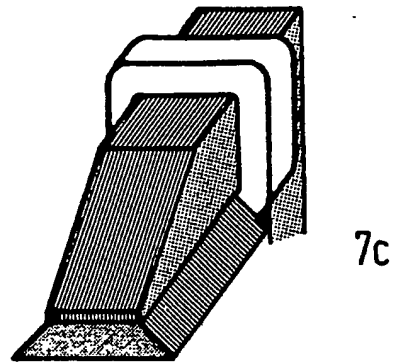
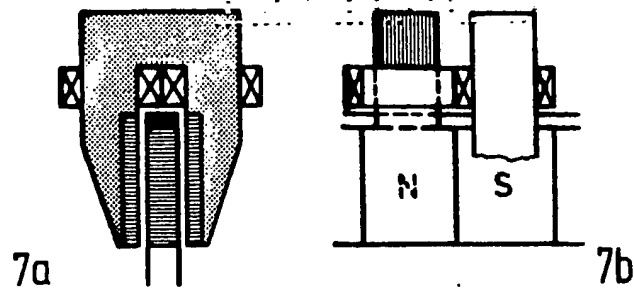


Bild 7

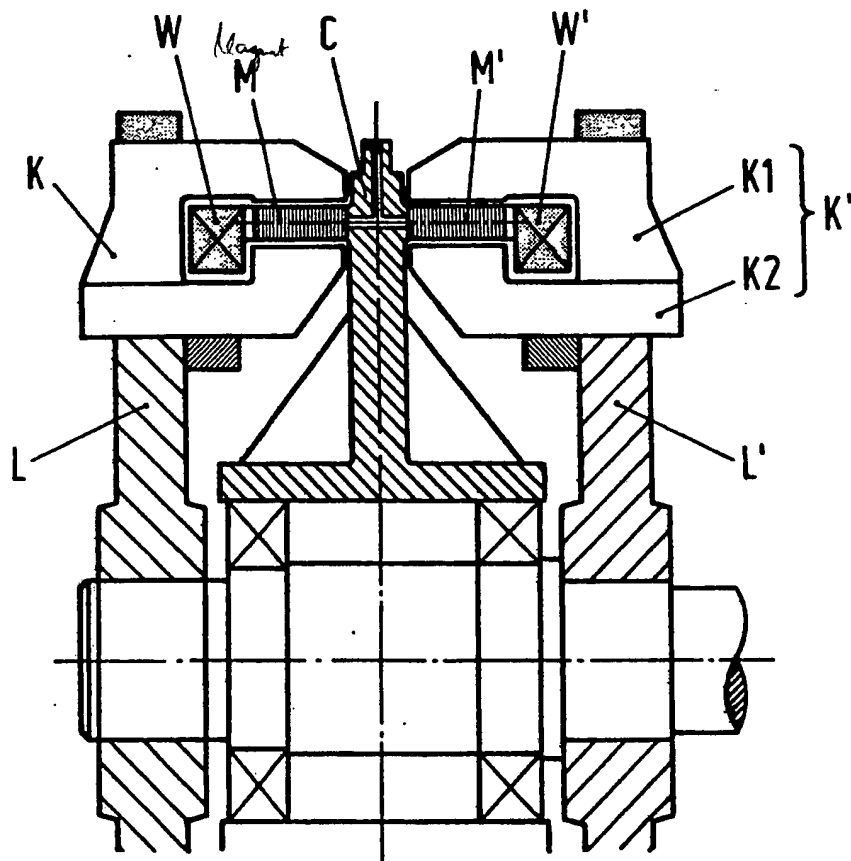


Bild 8

12 10 83

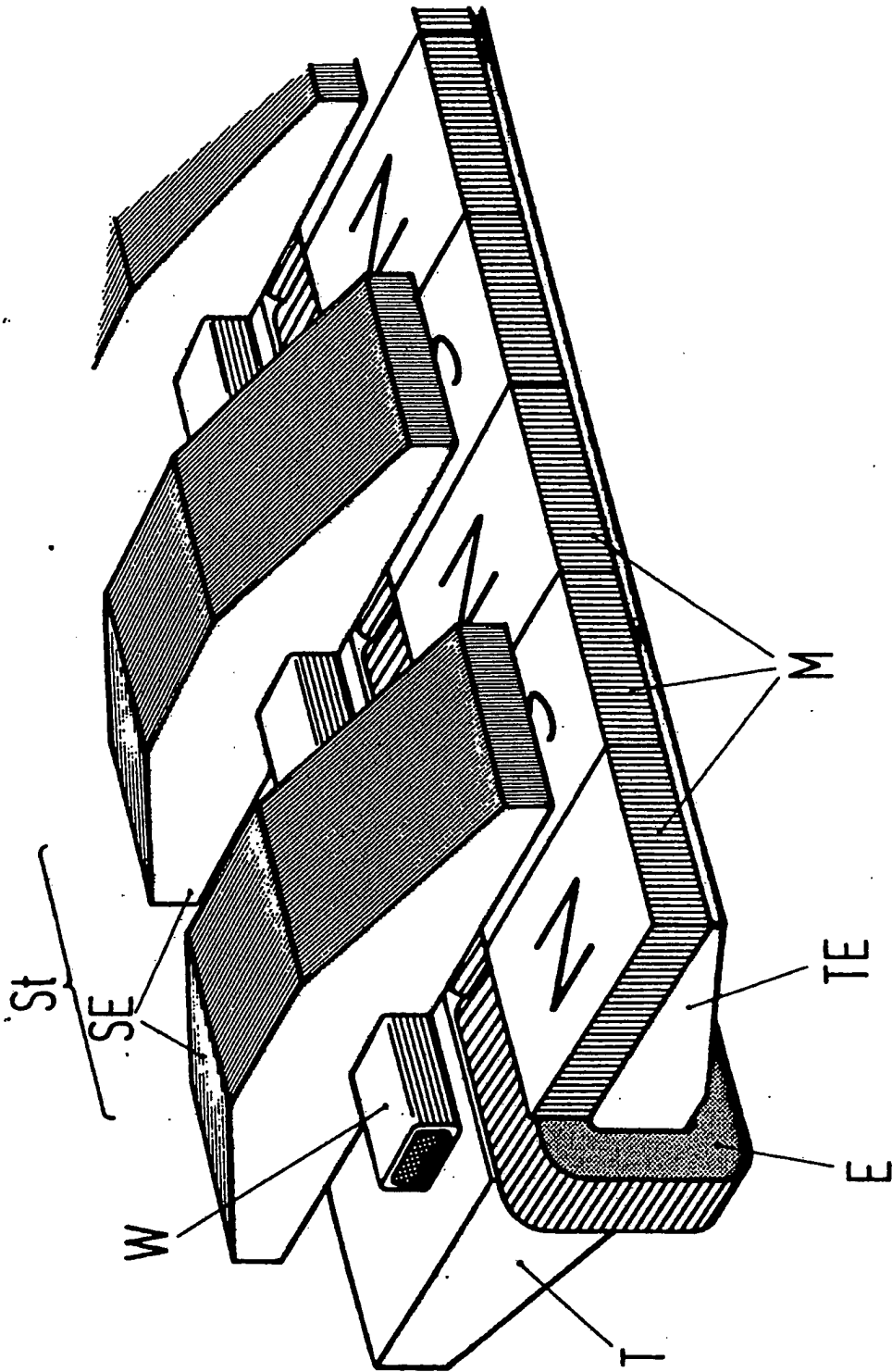


Bild 9

3536538

-27-

12-10-65

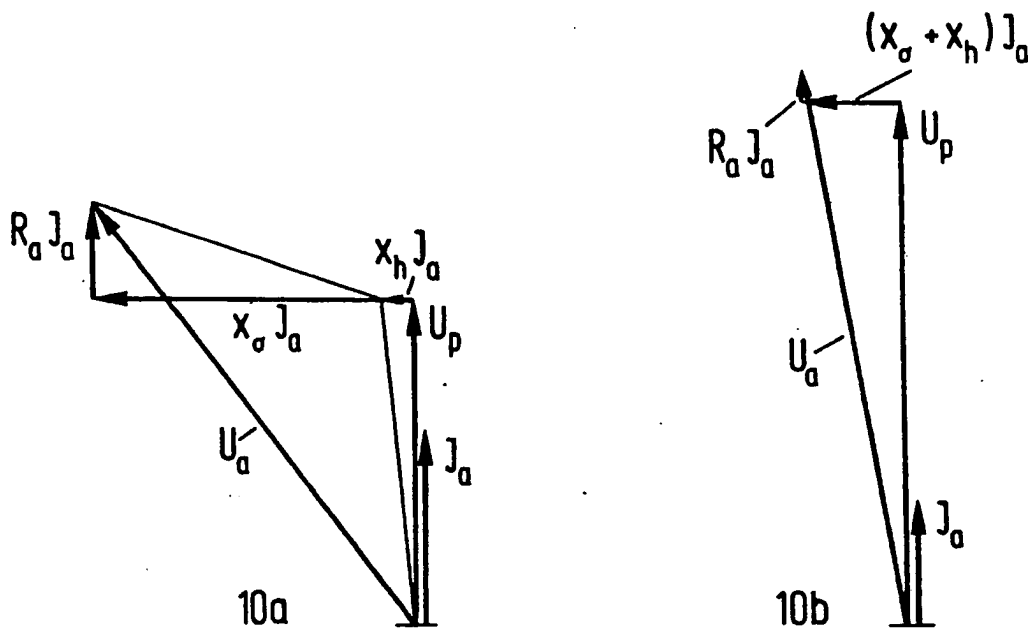


Bild 10